



# 新規 原電設計에서의 安全性增進方向

張 舜 興

韓國科學技術院 核工學科 教授

## 1. 배경 및 현황

원자력 기술은 20세기에 개발된 획기적인 신 기술로서 70년대 2차래의 석유파동 이래 세계 경제 성장의 전인차 역할을 수행해 왔다. 우리나라는 1978년 고리 1호기의 상업운전 개시로 원자력 발전시대가 시작되어, 지금은 9기의 원자력발전소가 가동중인 세계 10위권의 원자력 발전 국가로 부상하였다. 현재 원자력은 국내 전력수요의 약 50%를 공급하고 있으며, 국가경제 발전과 국민복지 향상에 필수불가결한 에너지 원이 되었다.

그러나 원자력 발전의 역할 증대에 있어서는 핵분열 과정에서 방사성 물질을 생성해 내는 특성이 커다란 장애물이 되고 있으며, 특히 TMI 및 체르노빌(Chernobyl) 사고는 원자력 산업에 큰 타격을 주었고, 원전의 안전에 대해 다시 한번 반성할 계기를 마련해 주었다. 지금 원자력 산업계는 원전의 안전성을 명백하게 입증하고 다시활성화시킬 수 있는 방향을 모색하고 있다.

WSAH-1400 보고서 등에서 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 방법을 사용하여 원전의 안전성을 분석한 바에 의하면, 원전에 의한 위험도는 다른 어떤 공학적 시스템으로 인한 것보다도 낮은 것으로 평가

되고 있다. TMI 사고에서 단 한 명의 인명 피해도 없었다는 사실은 원전이 안전하게 설계되었다는 것을 보여주는 한 예이다. 그러나, 비록 서방세계의 원전과 다른 설계이기는 하지만, 체르노빌 사고는 안전설비가 마비되고 제대로 관리하지 않았을 때 원전에서 나타날 수 있는 중대 사고의 결과가 얼마나 심각한 것인가를 보여 주었다.

현재 세계의 원자력계는 설계 개선 및 혁신을 통하여 안전성과 경제성을 향상시켜서, 일반 대중이나 사업자 모두가 받아들일 수 있는 새로운 원전을 개발하기 위해 노력하고 있다. 이러한 노력은 개량형 원자로와 신형 안전로의 두 방향으로 추진되고 있다. 개량형 원자로는 기존 설계의 골격을 유지하면서, 주로 보조계통, 기계와 인간의 연계사항(Man-Machine Interface), 격납용기 성능 등에서 개선 방향을 찾고 있다. 신형 안전로에서는 1차계통(핵 분열을 통해 생성된 에너지로 고압의 증기를 발생시키는 부분, 원자력발전소는 이러한 1차계통과 증기로부터 전기를 생성해 내는 2차계통으로 이루어져 있다) 설계를 혁신적으로 개선하여 운전원의 개입이나 보조계통에 크게 의존하지 않는 안전성을 갖도록 하며, 격납용기 설계에도 피동 안전성 개념을 도입한다.

이를 통하여 공공의 위험도나 경제적인 위험도를 대폭 줄일 수 있으며, 2차측은 화력발전소와 같은 등급의 규제를 적용할 수 있도록 하여 공정기간을 단축하고 원자력발전소의 경제성을 향상시킬 수 있다.

국내에서도 개량형 경수로인 표준 원전의 설계를 위해 노력하고 있으며, 보다 안전하고 경제적인 것으로 기대되는 신형 안전로의 개발에도 관심이 모아지고 있다.

이 글에서는 국내의 신규 원전 설계시 종합적인 안전성 증진을 위해 고려해야 할 여러 사항들에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 안전성 증진에 대한 일반적 고찰

### 2.1 안전성 증진의 기본 방향

원전의 안전은 좋은 설계와 제작, 건설과정에서의 엄격한 품질 보증, 그리고 훌륭한 운영 및 유지 보수에 의해 확보된다. 따라서 원전의 안전성을 증진시키기 위한 첫단계는 보다 안전한 설계 방안을 모색하는 일이며, 좋은 설계란 인간의 실수나 부품의 고장이 발생하더라도 원전이 안전하게 유지될 수 있는 기능을 갖춘 설계일 것이다. 특히 원전의 궁극적인 안전성은 중대사고에 달려 있으므로, 중대사고의 가능성을 극소화하고(사고 방지), 사고 발생시에도 그 영향이 외부에 미치지 않도록 하는(사고 결과 완화) 설계가 이루어져야 한다.

처음 미국에 세워진 상업용 원전인 Shippingport 발전소는 가압경수로형으로서 기존의 잠수함에서 인정한 기술을 그대로 이전하였다. 잠수함에서 쓰던 작은 노심을 사용하면서도 안전성을 확보하기 위해서는 다양한 안전장치와 그들 장치에 대한 독립성(Independency) 및 다중성(Redundancy)의 개념이 도입되어야 했다. 이로 인해 기존 원전은 비교적 작은 운전 여유도와 복잡한 안전 장치를 갖게 되었으며, 따라서 비상 사태 발생시에는 운전원에게 후속조치에 필요한

충분한 시간이 주어지지 않으며, 다양한 계통으로부터의 많은 정보가 한꺼번에 제공되어 효율적으로 대처하기가 어렵다.

이런 상황에서 볼 때, 앞으로의 원자로 설계 개념은 추가되는 안전장치(Add-on Type)에 의해서가 아니라, 본질적인 자연법칙에 의해 안전성(Inherent Safety)을 확보하면서 계통을 단순화하는 방향으로 나가는 것이 바람직하다.

### 2.2 신규 원전의 안전성 향상 목표

1) 정성적 목표: 대중 개개인의 생활과 건강에 현저한 추가 위험을 주지 않아야 하며, 사회적 위험도는 전기생산을 위해 현존하는 다른 기술로 인한 위험도 이하로 유지해야 한다.

2) 정량적 목표: 국가에 따라 다르게 설정되어 있지만, 미국의 경우는 원전사고로 인한 원전 인근 주민의 사망 위험도가 다른 사고로 인한 전체인구의 사망 위험도의 0.1%를 초과하지 않고, 원전 주민의 암사망 위험도는 다른 요인들로 인한 암발생 위험도의 0.1%를 초과하지 않는 범위를 유지하는 것을 목표로 하고 있다.

## 3. 개량형 경수로의 설계 방향

개량형 경수로가 차세대의 원전으로 성공하기 위해서는 안전성을 최우선 과제로 하여 성능, 유지성, 환경과의 적응성 등 모든 면에서 설계 개선된 발전소이어야 한다. 또한 사업자의 투자를 보호하기 위해 경제적이어야 한다. 여기에는 건설 단가와 공기의 정확성, 인허가의 확실성, 적정 수준의 운전 및 유지 비용, 그리고 중대사고의 가능성이 극히 낮다는 보장이 필요하다.

개량형 경수로 설계에서 특히 중점을 두어야 할 부분은 운전 여유도 증진, 기계와 인간의 연계사항의 강화, 지원 시스템의 설계 개선 등을 통해 사고 발생 가능성을 줄이고, 격납용기 성능 향상을 통해 혹시 발생할지도 모르는 사고의 영향을 부지 내로 제한시키는 방안의 모색이다. 개선 방향을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

### 3·1 안전성 우선과 운전 여유도 증진

개량형 경수로는 안전성이 첫번째로 강조되어야 하고, 다른 설계 목적을 희생하더라도 노심손상사고의 위험을 낮추어야 하며, 비록 노심손상이 발생하더라도 발전소 외부의 사람들에게는 피해를 주지 않도록 설계되어야 한다.

그리고 개량형 경수로는 충분한 운전 여유도를 지녀서, 예상되는 과도상태에서는 안전계통에 피해를 입히지 않고도 스스로 극복할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 또한 사고시에도 커다란 재해가 발생함이 없이 운전원이 조치할 수 있는 충분한 시간적 여유를 제공하여야 한다. 발전소의 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 계통이나 부품 설계에도 충분한 여유도가 주어져야 한다.

### 3·2 기계와 인간의 연계사항의 강화

TMI와 체르노빌 사고를 비롯한 크고 작은 원전 사고들을 분석할 때, 현재의 원전에서 가장 취약한 부분은 역시 기계와 인간의 연계사항임을 알 수 있다. 따라서 개량형 경수로의 설계에서는 인간의 실수를 극소화 할 수 있도록, 특히 다음 사항이 강조되어야 할 것이다.

- Micro-Processor Technology의 적용
- 주제어실 설계시 인간 공학적 고려
- 인공지능을 이용한 운전지원 시스템의 개발

### 3·3 지원계통(Supporting System)의 강화

1차계통 기기는 일반적으로 안전등급 1(Safety Class 1)로 제작, 설치되므로 원전의 가동 중에 긴급 비상정지를 유발하는 요인이 되는 경우가 거의 없다. 그러나 1차계통을 지원하는 2차계통은 일반 상업급 사양으로 제작되므로 긴급 비상 정지를 유발할 수 있는 많은 결함을 가질 수 있다. 따라서 보조기계계통 중에서 1차계통에 영향을 주는 지원 계통을 더욱 강화함으로써 보조기계계통에서 생기는 사고가 노심용융사고와 같은 중대사고로 발전하지 않도록 하는 것이 안전성 증진에 큰 역할을 한다.

지원 계통과 관련한 설계 개선 항목은 다음과

같다.

○발전소의 정전 방지를 위해 발전기 차단기를 설치하거나 가스 터빈을 별도로 설치하는 등 전원 공급의 다중화.

○제어 방식에 신기술을 도입하여 플랜트 컴퓨터 입력신호 전송에 신호 다중화 방식을 사용하거나, On-Off 기기제어계통에서 직접 디지털 제어방식을 사용.

○해수위가 낮아지더라도 기기냉각수계통 및 기기냉각해수계통이 정상적으로 작동할 수 있도록 기기냉각해수계통의 설계 강화.

○핵연료 및 사고 후 시료채취계통의 단일화를 통한 시료 채취계통의 능력 향상.

### 3·4 격납용기 설계 개선

격납용기는 평상시 핵증기공급계통 기기들을 외부로부터 보호하는 역할을 하지만, 사고시 방사능 물질이 원자로냉각계통으로부터 방출되었을 경우는 이를 외부 환경과 차단하는 중요한 역할을 한다. TMI 사고에서 체르노빌 사고와 달리 발전소 외부에 방사능 피해를 전혀 주지 않았던 것은 격납용기의 공헌이라고 해도 과언이 아니다. 그러나 기존의 격납용기는 기본적으로 냉각재상실사고(LOCA) 등 설계기준사고에 대비하여 설계된 것이므로 공학적인 안전계통이 제대로 작동하지 않았을 때 발생할 수 있는 중대사고에 적절히 대응하리라고 기대할 수는 없다. 따라서 중대사고까지를 고려하여 사고시 전전성을 유지함으로써 방사성 물질을 효율적으로 차단할 수 있도록 설계를 개선해야 할 것이다.

격납용기 설계 개선시에는 중대사고시의 조기 파손을 방지하는 대책이 가장 중요하며, 여기서 중요하게 반영하여야 할 사항은 다음과 같다.

1) 수소 폭발로 인한 파손 가능성을 줄이도록 수소 폭발에 견디는 충분한 격납용기 설계 여유(체적, 허용 압력, 내부 형상 등), 수소 연소기(Hydrogen Recombiner) 성능 개선, 산소농도 제한, 콘크리트 재질 개선 등의 방안을 강구한다.

2) 노심-콘크리트 반응 등 노심용융물로 인한 파손 가능성을 줄이도록 격납용기 구조 개선 등을 강구한다.

3) 고압 용융 분출로 인한 파손 가능성을 줄이기 위해 1차계통의 감압 또는 격납용기 설계 여유 제공 방안 등을 강구한다.

아울러 시간이 지난 후의 격납용기 파손을 방지하기 위해서는 압력 상승을 제한하기 위해서 격납용기 열제거 기능을 보다 강화하거나 격납용기 대기를 방출하는 방안이 고려되어야 할 것이다. 격납용기 대기 방출시에는 방사능 물질이 누출되지 않도록 신뢰성 있는 여과 기능의 확보가 중요하다.

#### 4. 신형 안전로의 설계 방향

개량형 경수로 설계에서는 운전 여유도를 증진시키기 위해 1차계통을 부분적으로 개선하고, 주로 보조계통 및 기계와 인간의 연계사항 측면에서 개선 방향을 찾았다. 반면에 신형 안전로의 경우는 1차계통 설계를 혁신적으로 개선하여 고유 안전성 (Inherent Safety) 과 피동 안전성 (Passive Safety) 을 현저하게 증진시킴으로써 보조계통에 크게 의존하지 않는 안전성을 갖도록 꾀하고 있다. 또한 격납용기의 피동적 안전성 확보로 노심 용융사고가 발생하더라도 발전소 외부에 주는 방사능 피해를 극소화할 수 있도록 한다.

신형 원자로와 관련해서는 국내에서 추진할 노형이 아직 합의되지 않은 상태이므로 설계시의 고려사항을 구체적으로 논의하는 것은 시기상조인 것 같다. 따라서 신형 안전로 설계 방향은 모든 경수로형에 있어서 가장 핵심이 되는 1차계통과 격납용기 계통만을 간단히 논의하기로 한다.

##### 4.1 핵증기 공급계통 설계

핵증기 공급계통 (Nuclear Steam Supply System, NSSS) 설계에서는 이상상태 발생시

원자로를 안전하게 정지 (Safety Shutdown) 시키는 문제와 원자로 정지 후의 붕괴열을 안전하게 제거 (Decay Heat Removal) 하는 문제가 핵심사항이다.

원자로의 정지는 현재 논의되고 있는 대부분의 신형 안전로에서와 같이 두가지 방법으로 달성할 수 있어야 할 것이다. 즉 보통의 경우는 제어봉 계통으로 원자로를 정지시키지만, 제어봉의 작동이 불가능한 경우라도 피동 안전주입 또는 고유 안전성에 의해 노심 출력을 붕괴열 수준으로 낮출 수 있는 최소한의 기능을 갖추는 것이 바람직하다. 이와 관련하여 설계시 유의할 사항은 제어봉 구동계통의 신뢰도 향상, 원자로 정지에 요구되는 피동 안전주입 또는 고유 안정성의 확보 등이다.

원자로 정지 후의 붕괴열 제거는 펌프 등을 사용하지 않고도 피동 안전주입 및 자연순환기능만으로도 가능해야 한다. 즉 사고 발생 직후의 붕괴열 제거는 중력이나 Steam Injector 등을 이용한 피동 안전주입에 의존하고, 장기간 냉각은 노심보다 높은 위치의 열교환기를 통과하는 자연순환에 의해 이루어져야 할 것이다. 여기서는 물론 충분한 양의 냉각수가 필요하다. 이를 통해, 사고가 발생하더라도 운전원의 개입 없이도 수 일 동안 노심 냉각이 이루어져야 한다.

이와 같은 사항들이 고려되면 경수로형 신형 안전로라 하더라도 기존 원전의 NSSS와는 크게 다른 설계가 될 것이다. 그리고 원전의 안전성이 NSSS 자체의 특성에 의해 확보되므로 보조계통에서의 고장으로 인한 위험도가 현저하게 줄어들 수 있을 것이다.

##### 4.2 격납용기 설계

격납용기는 중대사고가 발생했을 때 방사능을 일반 대중 및 환경으로부터 격리시키는 최종적인 수단이다. 따라서 사고기간 동안 격납용기의 전전성과 성능을 유지하는 것은 안전성 측면에서 극히 중요하다.

격납용기의 설계에서는 사고로 인해 1차계통

에너지가 격납용기 대기로 전달되었을 때 이를 효율적으로 냉각시켜서 사고 기간 동안 건전성이 유지되도록 하는 문제가 가장 중요하다. 기존 격납용기들은 능동적 방법에 크게 의존하고 있지만, 국한 상황에서의 능동 부품의 신뢰성 문제 때문에 이 기능은 자연순환이나 다른 피동적 방법에 의해 이루어져야 한다.

#### 4.3 국내개발 방향

국내에서는 신형 안전로의 구체적인 개발 방향이 아직 합의되지 않았다. 그러나 신형 안전로가 차세대의 주종 원자력 기술로 자리잡을 것이 거의 확실하므로 이에 대한 구체적 방향 정립과 적극적인 추진이 시급한 것으로 판단된다. 신형 안전로와 관련하여 국내에서 수행되어야 할 연구는 개발 연구와 규제 연구로 구분할 수 있다.

신형 안전로는 국내의 현 기술수준에 비추어 볼 때 대부분 국산화가 가능할 것으로 판단된다. 따라서 국내 유관기관간의 산·학·연 협동체제를 구축하여 시급한 기초연구를 수행하면서 국제적인 공동 연구에 효율적으로 참여하면 신형 안전로 기술 자립과 국내 기술에 의한 원전 건설이 가능할 것이다. 이를 위해서는 국가적인 지원이 절실함은 물론이다.

그리고 신형 안전로에 대한 규제와 개발은 지금부터 시작해야 할 것이다. 신형 안전로에서는 특히 혁신적인 설계 개념을 많이 도입하므로 규제 측면에서는 '혁신'과 '실증' 사이의 갈등이 필연적이다. 따라서 이에 대한 규제 기관의 방

침이 가능한 한 빨리 결정되어야 하며, 이는 신형 안전로 개발 과정에서 큰 영향을 미칠 것이다.

### 5. 맺음말

앞에서 원전 설계의 개선 및 혁신에 관한 배경 및 현황, 설계 방향 등을 논의하였다. 기존의 원전이 경험이나 연구 분석을 통해 볼 때 다른 어떤 공학적 시스템보다도 안전한 것이 사실이지만, 아직도 안전성을 보다 향상시킬 수 있는 여지가 많다.

원전의 안전성 증진을 위해서는 중대사고에 대한 실존의식을 갖고 이를 예방 또는 완화하기 위한 설계를 모색해야 한다. 개량형 경수로 설계에서는 특히 지원시스템의 강화에 역점을 두어 중대사고의 발생 가능성을 줄이고, 이와 아울러 격납용기 성능 향상으로 사고의 결과를 최대한 완화시켜야 할 것이다. 반면에 신형 안전로 설계에서는 고유 안전성 및 피동 안전성 등 자연법칙에 의해 보장되는 안전성을 최대한 도입하여 본질적으로 보다 안전하고 단순한 원전이 되도록 해야 할 것이다.

개선과 혁신을 통해 설계 자체의 안전성이 크게 향상되고, 이와 아울러 기기 설계, 제작 및 건설 과정에서의 엄격한 품질 보증과 훌륭한 운영 및 유지 보수가 이루어진다면 인허가 제도를 비롯한 제도상의 개선과 더불어 신규 원전의 안전성을 크게 증진시키고, 활력있는 제2의 원자력 시대를 가져오는 데 밑받침이 될 것이다.

#### 참고문헌

1. "2000년대 원자력 전망 및 대처방안 수립에 관한 연구", 부록 II, 한국전력공사(1989).
2. "Next Generation Reactor 특성과 활용", 원자력산업 7 - 5 (1985).
3. M. W. Golay, "An Agenda for Improving Present-Day Reactors," Technology Review, (Feb/March 1984).
4. L. M. Lidsky, "The Reactor of the Future," Technology Review, (Feb./March 1984).
5. 장순홍, "원전설계의 개선 및 혁신", 원자력산업(1984).
6. 장순홍, "신형원자로의 열수력학적 특성에 관한 고찰", 한국원자력학회지 제22권 제2호(1990).